中国生态农业学报 2017年10月 第25卷 第10期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Oct. 2017, 25(10): 1423−1432

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170111

丁改改, 蒋进, 宋春武, 李生宇, 王海峰, 周杰, 李亚萍. 古尔班通古特沙漠人工梭梭林群落生态特征研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10): 1423−1432

Ding G G, Jiang J, Song C W, Li S Y, Wang H F, Zhou J, Li Y P. Ecological characteristics of cultivated *haloxylon ammodendron* communities in Gurbantunggut Desert[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(10): 1423−1432

古尔班通古特沙漠人工梭梭林群落生态特征研究*

丁改改[1,2], 蒋 进[1**], 宋春武[1], 李生宇[1], 王海峰[1], 周 杰[1,2,3], 李亚萍[1,2]

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测试验站 策勒 848300)

摘 要: 为探究古尔班通古特沙漠南缘莫索湾地区 33 年来人工梭梭林群落(依靠天然降水)的生态特征, 本文对两种造林技术(积雪-客沙造林和秋灌造林)人工梭梭林地梭梭的长势、草本植物、土壤水分进行了调查和监测。结果表明: ①积雪-客沙造林和秋灌造林梭梭至今生长良好, 目前植株高度和冠幅均大于 2 m 和 2 m^2, 当年新生枝条长度均大于 20 cm; 初始造林梭梭存活率较高, 分别为 40%和 63%; 经过自然更新, 现有密度均有所提高, 人工林形成异龄复层混交林, 林下生长有不同优势种的草本植物; 土壤含水量均>2.00%, 能够满足梭梭生长。②由于两种造林技术的土地处理方式和初期水分供给量不同, 导致两种林地梭梭生长、林下草本植物盖度和多样性以及天然更新梭梭植株数量均有很大差异, 整体秋灌造林地的状况优于积雪-客沙造林地。③两种造林技术对于当地生态条件均有很好的适应性, 虽然积雪–客沙造林密度相对较低, 但优于自然植被状况, 且造林成本低; 秋灌造林密度较大, 天然更新植株数量较多, 但造林成本高, 后期生长较缓慢, 需要采取一定的人工措施调整密度。综上可知, 积雪-客沙造林和秋灌造林梭梭目前生长均较稳定, 后者对该区生态条件适应性更强。

关键词: 积雪-客沙造林; 秋灌造林; 梭梭林; 自然更新; 物种多样性; 土壤水分; 古尔班通古特沙漠
中图分类号: S72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)10-1423-10

Ecological characteristics of cultivated *Haloxylon ammodendron* communities in Gurbantunggut Desert*

DING Gaigai[1,2], JIANG Jin[1**], SONG Chunwu[1], LI Shengyu[1], WANG Haifeng[1], ZHOU Jie[1,2,3], LI Yaping[1,2]

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Cele National Station of Observation and Research for Desert-Grassland Ecosystems, Cele 848300, China)

Abstract: The ecological characteristics of *Haloxylon ammodendron* communities cultivated under rainfed conditions for 33 years in Mosuowan of Southern Gurbantunggut Desert were analyzed under two afforestation techniques — snow-sand dressing afforestation and autumn-irrigated afforestation. The growth potential, understory vegetation and soil water content were monitored and recorded. Results showed that: 1) *H. ammodendron* had strong growth with an average plant height and canopy spread under both cultivation techniques exceeding 2 m and 2 m^2, respectively. The average length of new branches was more than 20 cm, with a survival rate of afforestation of 40% under snow-sand dressing and 63% under autumn irrigation. The den-

* 国家科技部对发展中国家科技援助项目(KY201502003)资助
** 通讯作者: 蒋进, 主要研究方向为荒漠环境治理与绿洲生态建设。E-mail: jiangjin@ms.xjb.ac.cn
丁改改, 主要从事荒漠区土壤水分及植物多样性研究。E-mail: gai_gaiding@163.com
收稿日期: 2017-02-09 接受日期: 2017-05-23

* The study was supported by the Scientific & Technology Program of Developing Countries Assisted by the Ministry of Scientific and Technology of the People's Republic of China (KY201502003).
** Corresponding author, E-mail: jiangjin@ms.xjb.ac.cn
Received Feb. 9, 2017; accepted May 23, 2017

sity was enhanced and uneven-aged mixed forest was formed due to natural regeneration. There were different kinds of dominant species herbs in the forest. The average soil water content under the two forest treatments both exceeded 2.00%, which was enough to support *H. ammodendron* growth. 2) There were obvious differences between the two forests cultivation techniques in terms of vegetation cover and species diversity and natural regeneration of *H. ammodendron* due to the differences in the treatments, site conditions and initial water supply. 3) The two communities were highly adaptable to the local ecological conditions. Compared with autumn irrigated afforestation, the density, vegetation cover and number of natural regeneration were lower in snow-sand dressing afforestation. The cost also was lower, but grew slowly under autumn irrigated afforestation after irrigated was stopped. There was the need for effective artificial measures to reduce the density of *H. ammodendron*. In conclusion, *H. ammodendron* growth under snow-sand dressing and autumn irrigated afforestation was both stable with the latter well-adapted to the local ecological conditions.

Keywords: Snow-sand dressing afforestation; Autumn-irrigated afforestation; *Haloxylon ammodendron* forest; Natural regeneration; Species diversity; Soil water content; Gurbantunggut Desert

人工造林是防治沙漠化的有效措施之一，在我国西北荒漠地区生态恢复重建中发挥了重要作用[1-3]。但 20 世纪 50 年代以来，世界各国人工林衰退现象时有报道，我国部分人工林也出现了衰退、甚至死亡现象[4]，如：部分“三北”防护林出现林木衰退；甘肃河西走廊主要造林树种杨树(*Populus* spp.)生长缓慢或停滞，成“小老头树”；科尔沁沙地主要造林树种樟子松部分死亡。这些现象发生的主要原因是人工林树种选择、种植技术与当地生态条件不完全适应[5-7]。

古尔班通古特沙漠是我国第二大沙漠，以固定、半固定沙丘为主。20 世纪 80 年代以来，由于气候变化和人为活动的干扰，沙漠天然植被严重退化，覆盖度明显降低，部分地段植被盖度甚至降低至 5%以下，沙漠趋向活化[8]。在古尔班通古特沙漠西南缘的莫索湾地区是沙丘活化的典型区域，绿洲外围沙丘普遍活化，形成了一条宽约 10~20 km，长 80 km 的沙丘活化带，大部分已演变成流动沙丘，侵入绿洲，埋没农田，对沙漠边缘农业生产、人民生活和生态环境造成严重危害[8-10]。1984 年，中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所(现为中国科学院新疆生态与地理研究所)科学家根据当地实际条件，进行了秋灌造林和积雪-客沙造林技术试验，成功建造了人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林，固定了活化沙丘，改善了区域生态环境，保障了绿洲生态安全[11]，并在区域内进行了大规模应用推广，促进了区域生态退化的恢复。莫索湾地区属干旱荒漠生态系统，降水稀少，年变率大[12]，积雪-客沙造林自种植起仅依靠天然降水维持生长，秋灌造林也仅在造林最初 4 年进行过人工灌溉。因此，两种林地在长期免灌溉条件下，土壤水分是否能够满足林地梭梭的正常生长，林地群落的生态特征状况如何，以及两种林地在推广应用中的可靠性和林地功能发挥的可持续性等都是亟待研究和解决的问题，这也是评价研究区造林技术对区域适应性的关键。

本文从土壤水分状况、林分自然更新和林下草本物种多样性等林地关键生态特征角度，对近 8 a 两种造林技术下梭梭林土壤水分监测数据、2016 年林分龄级分布以及林内植被组成调查数据分析，明确了该区 33 a 来人工梭梭林群落生态特征，并探讨该区两种人工林造林技术的异同和功能发挥的可持续性，为干旱区人工造林技术适宜性评价提供科学依据。

1 研究区概况

莫索湾(45°03′N，86°06′E，海拔 314 m)位于古尔班通古特沙漠西南缘，为典型大陆干旱荒漠气候，年降水量 114.89 mm，年蒸发量 1 942.1 mm，干燥度 16.9；年平均气温 4~6 ℃，≥10 ℃的活动积温 3 000~3 500 ℃，年平均日照时数 3 100~3 200 h；春夏两季为风季，最大风速达 20 $m\cdot s^{-1}$。该区冬季积雪厚度约为 13 cm 左右，最厚可达 27 cm，春季温度回升，积雪融化，降水增多，土壤湿润含水量增加。地带性土壤为荒漠灰钙土，部分土地发生碱化[13]。

积雪-客沙造林是利用沙土湿沙层进行造林。即在自然流沙地上，早春将沙地表层上的积雪扫成堆，待雪融化后，人工挖掘植树坑，坑内径 60 cm 以上，挖透干沙层，栽植梭梭后，将湿沙再填入坑内，当时的造林密度为 667 株·hm^{-2}，造林后至今 33 a 未进行人工灌溉(图 1)[8]。

秋灌造林是在机械平整的沙地上，于秋季灌溉翌年春季造林。沙地平整后，作畦开沟，畦宽 3~10 m，沟距 4~5 m，10 月份畦漫灌 1 000~1 400 $m^3\cdot hm^{-2}$，沟灌 750~900 $m^3\cdot hm^{-2}$；翌年 3 月按 2 500 株·hm^{-2} 进行造林，造林后前 4 a(1984—1987 年)每年秋季补水一次，灌溉量约为 1 500 $m^3\cdot hm^{-2}$，后至今，共计 29 a 无人工灌溉[14](图 1)。



图 1　莫索湾地区 2016 年积雪-客沙造林(左)和秋灌造林(右)的 33 a 生梭梭林的生长现状
Fig. 1　Growth conditions of 33 years old *Haloxylon ammodendron* forests planted with snow-sand dressing afforestation (left) and autumn irrigated afforestation (right) methods in Mosuowan area in 2016

2　研究方法

2.1　观测样地设置

2016 年 4 月，在积雪-客沙造林地长期土壤水分观测点周围，选择林地长势相近、林分密度相似的区域，分别设置 4 个 10 m×10 m 的调查样地，编号为 A_1、A_2、A_3 和 A_4，样方间距保持在 50 m 以上。以同样方式，在秋灌造林地长期土壤水分观测点周围，选择 4 个 10 m×10 m 灌木调查样地，分别编号为 B_1、B_2、B_3 和 B_4。对样地中梭梭植株进行统一编号(2016 年当年生梭梭植株除外)，按照对角线法设置 5 个 1 m×1 m 的林下草本植物调查小样方，分别调查林下草本植被状况(图 2)。

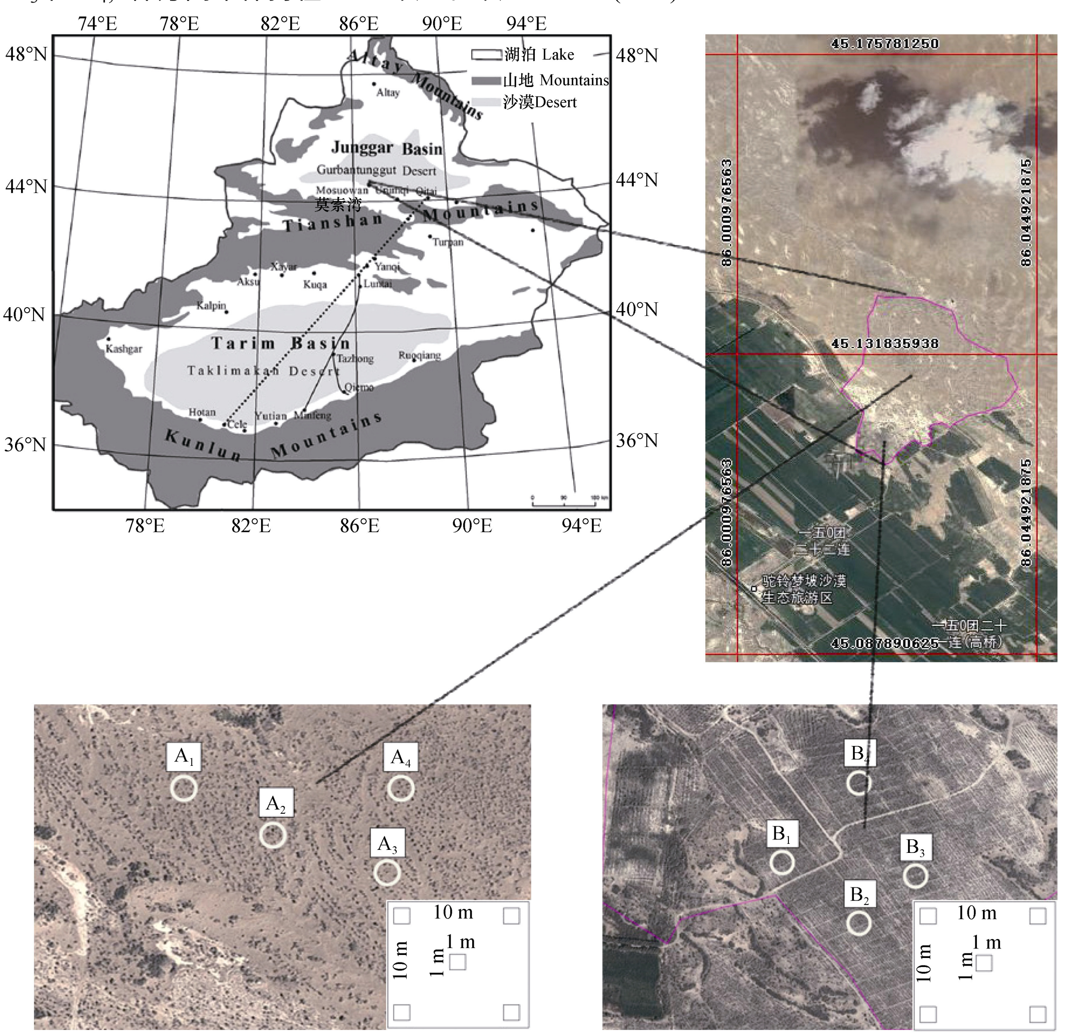


图 2　莫索湾地区积雪-客沙造林(A_1、A_2、A_3 和 A_4)和秋灌造林(B_1、B_2、B_3 和 B_4)样地设置
Fig. 2　Sample-plots in snow-sand dressing afforestation region (A_1, A_2, A_3 and A_4) and autumn irrigated afforestation region (B_1, B_2, B_3 and B_4) in Mosuowan area

2.2 梭梭种群特征观测

2.2.1 长势

2016 年 5 月，记录样地内梭梭种群的现存活梭梭株数，与初始造林株数(根据造林密度计算)之比，得到梭梭种群的存活率。4—10 月，在每块样地人工种植梭梭种群(根据行列、株高和地径判断)中选择 17 株标准木(挂牌)，用钢卷尺定期测量株高(cm)、冠幅直径(cm)；每株固定(挂牌)测量 15 个新生枝条，测量其生长量。4 个样方测值取平均值。

2.2.2 种群龄级结构

前人研究表明，无论在哪种生境下，在株高、冠幅和地径 3 个指标中，梭梭种群内植株个体间的株高变异系数都最小，能较好地反映梭梭的年龄[15-17]。故本文以株高为龄级划分标准。2016 年 7 月，测量样地中梭梭种群内所有梭梭植株的株高。依据梭梭株高，以 40 cm 作级差，将调查样地内梭梭划分成Ⅰ~Ⅵ个龄级，统计梭梭种群内各龄级株数所占比例。同时，于 2016 年 4—11 月，定期记录样地梭梭种群内新生梭梭幼苗的株数，计算幼苗的存活率和死亡率。

2.3 林下植被调查

2016 年 4—6 月，调查记录样方中林下草本植物的种类、株数，并测量每株植物的株高和冠幅。用数码相机对草本样方垂直拍照，用软件 Image Pro Plus 获得照片中植物地上部分地面垂直投影面积百分数，计算出各样方的植被盖度(%)，多个样方取平均值。

2.4 土壤含水量测定

2009—2016 年，每年 4—10 月，每月中旬采用土钻取样，取样深度 0~120 cm，按 10 cm 分层；样品带回实验室，用 1/1 000 电子天平称鲜重，在烘箱内(105 ℃)烘 8 h 后，测定土壤含水量。

2.5 数据处理与分析方法

用 Origin 8.0 软件绘图，用 SPSS 20.0 数理统计软件对数据进行差异显著性分析(非参数检验)和 Pearson 相关分析。植物物种多样性指标包括重要值、物种丰富度指数 R 和 α 多样性[Shannon-Wiener 指数(H')、Simpson 指数(D)、Pielou 均匀度指数(J_{sw} 和 J_{si})]，计算方法参考陈生云等[18]。

3 结果与分析

3.1 人工梭梭林的种群特征

3.1.1 人工种植梭梭保存率

根据样地梭梭种群中正常生长龄级最大的梭梭植株数量的调查，参考最初造林密度，发现目前积雪-客沙造林梭梭植株保存率仅为 40%，而秋灌造林地保存率较大，平均可达 63%。

3.1.2 人工种植梭梭长势和当年新枝生长量

由图 3 可知，两种造林技术下梭梭株高 4—10 月均呈逐渐增高的趋势，说明目前梭梭仍能生长。2016 年积雪-客沙造林和秋灌造林梭梭平均株高分别为 2.43 m 和 2.35 m，积雪-客沙造林 8 月份株高显著降低，主要是因为两株高达 3.2 m 的梭梭因大风上部折断。积雪-客沙造林和秋灌造林梭梭的平均冠幅分别为 2.46 m^2 和 2.70 m^2，冠幅各月间生长波动性较大(受测量误差、沙鼠啃食等影响)，但总体呈增加趋势(图 3)。

梭梭当年新枝生长量逐渐增加(图 4)，各月均为积雪-客沙造林显著大于秋灌造林(4 月和 5 月除外)($P<0.05$)；在生长季末期，达到最大值，其中积雪-客沙造林 9 月达到 39.08 cm，秋灌造林 8 月份达到 28.49 cm(9 月因白粉病降低至 24.31 cm)。

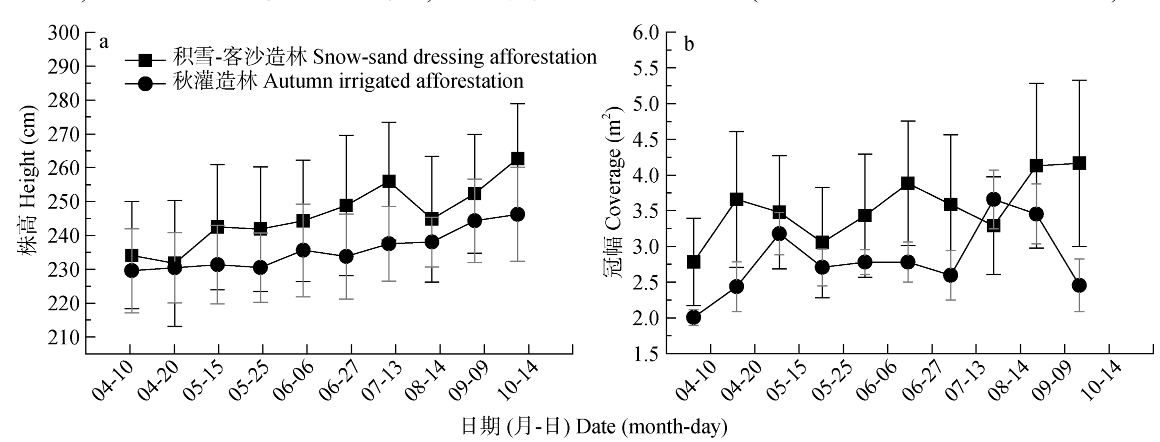


图 3 莫索湾地区积雪-客沙造林和秋灌造林的 33 年生梭梭株高和冠幅年内随时间的变化

Fig. 3 Annual variations of average height and crown diameter of 33 years old *Haloxylon ammodendron* forests planted with snow-sand dressing afforestation and autumn irrigated afforestation methods in Mosuowan area

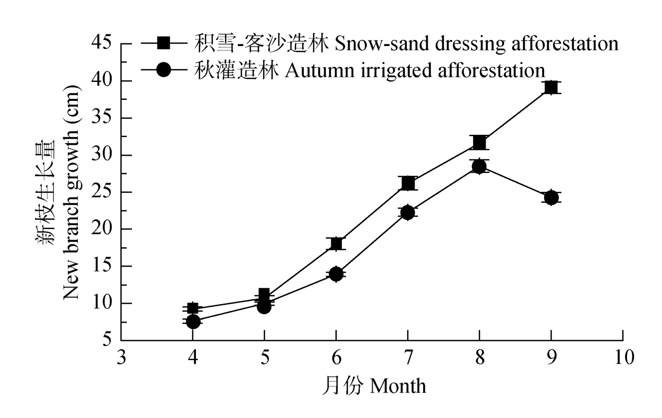


图 4　莫索湾地区积雪-客沙造林和秋灌造林的 33 年生梭梭月平均新枝生长量

Fig. 4　Monthly average new branch growth of 33 years old *Haloxylon ammodendron* forests planted with snow-sand dressing afforestation and autumn irrigated afforestation methods in Mosuowan area

3.1.3　人工梭梭林种群的龄级结构

植物种群结构是种群内不同大小、年龄个体数量的分布[19]。调查结果显示, 积雪-客沙造林地的梭梭种群密度为 825 株·hm^{-2}, 秋灌造林为 3 600 株·hm^{-2}, 均高于初始造林密度。根据株高对林地梭梭种群内植株进行了龄级划分, 各龄级植株占比如图 5 所示。低龄级梭梭(Ⅰ~Ⅳ龄级)是自然更新形成的, 用低龄级与高龄级梭梭(Ⅴ、Ⅵ龄级)之比可以表示种群的自然更新能力, 积雪-客沙造林地和秋灌造林地的比值分别为 0.8∶1 和 1.13∶1, 可见, 这两种梭梭林地均已具备较好的自然更新能力, 而秋灌造林地的自然更新能力相对更强。

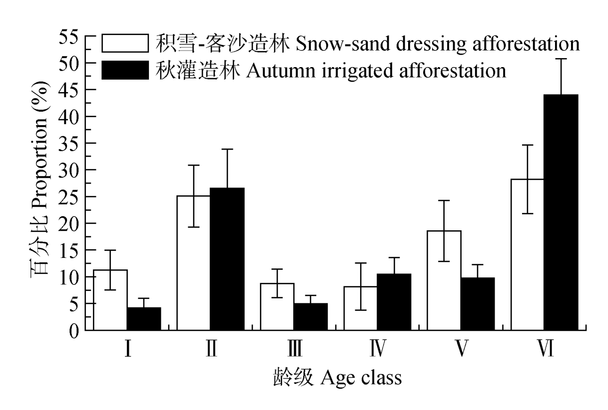


图 5　莫索湾地区积雪-客沙造林和秋灌造林的 33 年生梭梭龄级结构

Fig. 5　Age class structure of 33 years old *Haloxylon ammodendron* forests planted with snow-sand dressing afforestation and autumn irrigated afforestation methods in Mosuowan area

龄级按株高划分, Ⅰ龄级为≤40 cm, Ⅱ龄级为 40~80 cm, Ⅲ龄级为 80~120 cm, Ⅳ龄级为 120~160 cm, Ⅴ龄级为 160~200 cm, Ⅵ龄级为>200 cm。Age class is divided by plant height. The plant heights of age class Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ, Ⅴ and Ⅵ are ≤40 cm, 40–80 cm, 80–120 cm, 120–160 cm, 160–200 cm, and >200 cm, respectively.

在低龄级梭梭中, 各龄级所占比例不同, 尤以Ⅱ龄级梭梭所占比例最高, 积雪-客沙造林和秋灌造林分别达到 47%和 59%。这表明研究区梭梭种群的各年份自然更新植株数量不同, 在个别丰水年实生苗能够持续存活生长, 形成较强的竞争能力, 同时种群内不同龄级植株均有分布, 形成健康的种群结构。

3.1.4　当年自然更新梭梭幼苗存活率

2016 年对两种造林地梭梭种群新发生梭梭幼苗的存活变化过程绘制了存活率曲线(图 6), 发现夏季幼苗存活率较低, 只有少部分能存活至生长季末; 至 11 月中旬, 积雪-客沙造林梭梭存活率为 41.0%, 秋灌造林为 53.4%。

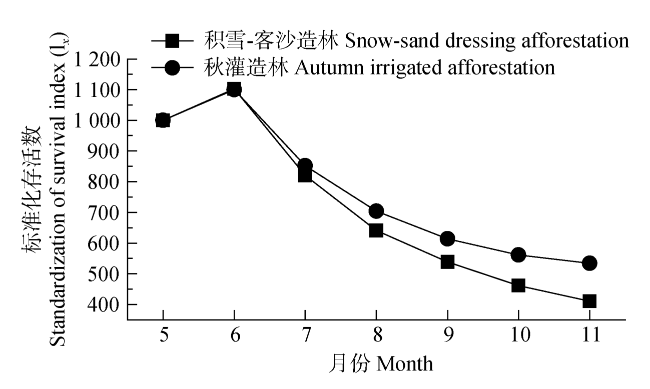


图 6　莫索湾地区积雪-客沙造林和秋灌造林的 33 年生梭梭林新生梭梭幼苗存活率曲线

Fig. 6　Survivorship curves of young seedlings of 33 years old *Haloxylon ammodendron* forests planted with snow-sand dressing afforestation and autumn irrigated afforestation methods in Mosuowan area

3.2　林下草本植物多样性

林下植被对保持沙漠稳定、防风固沙有重要作用[20], 是调整林分结构和恢复地力的主导驱动因子[21]。两种林地的林下植被均以藜科植物为主, 且短命植物分布较多, 物种丰富度表现为积雪-客沙造林高于秋灌造林。积雪-客沙造林地林下植被春季以弯曲四齿芥(*Tetracme Bunge*)、刺沙蓬(*Salsola ruthenica*)和狭果鹤虱(*Lappula semiglabra*)为优势种, 各优势种重要值基本一致; 秋季以沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)为优势种。秋灌造林地林下植被春季以虫实(*Corispermum orientale*)、滨藜(*Atriplex patens*)和卷果涩荠(*Malcolmia scorpioides*)为优势种, 虫实为绝对优势种; 而秋季以角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)为绝对优势种。积雪-客沙造林和秋灌造林地林下草本植被盖度分别为 25.12%和 32.23%, 超过沙面稳定临界植被盖度 14%[22], 能够有效地稳定沙面。两个林地草本植被 α 多样性不同, Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数差别不大, 而秋灌造林地的 Shannon-Wiener 指数低于积雪-客沙造林(表 1)。

表 1 莫索湾地区积雪-客沙造林和秋灌造林的 33 年生梭梭林地林下草本物种多样性
Table 1 Species diversity of understory herbaceous species in 33 years old *Haloxylon ammodendron* forests planted with snow-sand dressing afforestation and autumn irrigated afforestation methods in Mosuowan area

林地 Forest	种名 Specific name	科名 Family name	生活型 Biotype	重要值 Important value
积雪-客沙造林地 Snow-sand dressing afforestation area	土大戟 *Euphorbia turczaninowii*	大戟科 Euphorbiaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.052±0.002
	沙蓬 *Agriophyllum squarrosum*	藜科 Chenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	0.127±0.134
	齿稃草 *Schismus arabicus*	禾本科 Gramineae	短命植物 Ephemerophyte	0.152±0.067
	黄花软紫草 *Arnebia guttata*	紫草科 Boraginaceae	一年生草本 Annual herb	0.097±0.019
	近全缘千里光 *Senecio subdentatus*	菊科 Compositae	短命植物 Ephemerophyte	0.064±0
	弯曲四齿芥 *Tetracme quadricornis*	十字花科 Brassicaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.187±0.146
	狭果鹤虱 *Lappula semiglabra*	紫草科 Boraginaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.188±0.079
	甘新念珠芥 *Neotorularia korolkowii*	十字花科 Brassicaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.044±0
	叉毛蓬 *Petrosimonia sibirica*	藜科 Chenopodiaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.072±0.026
	刺沙蓬 *Salsola ruthenica*	藜科 Chenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	0.178±0.165
	梭梭 *Haloxylon ammodendron*	藜科 Chenopodiaceae	小半乔木 Small tree	0.087±0.007
	天芥菜 *Heliotropium europaeum*	紫草科 Boraginaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.053±0.009
	倒披针叶虫实 *Corispermum lehmannianum*	藜科 Chenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	0.084±0.100
	早熟猪毛菜 *Salsola collina*	藜科 Chenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	0.042±0
	砂兰刺头 *Echinops gmelini*	菊科 Compositae	短命植物 Ephemerophyte	0.052±0
	盐生草 *Halogeton glomeratus*	藜科 Chenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	0.035±0
	硬萼软紫草 *Arnebia euchroma*	紫草科 Boraginaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.055±0
秋灌造林地 Autumn irrigated afforestation area	虫实 *Corispermum hyssopifolium*	藜科 Chenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	0.368±0.097
	卷果涩荠 *Malcolmia scorpioides*	十字花科 Brassicaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.118±0.013
	角果藜 *Ceratocarpus arenarius*	藜科 Chenopodiaceae	一年生草本 Annual herb	0.084±0.030
	萹蓄 *Polygonum aviculare*	蓼科 Polygonaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.109±0.046
	梭梭 *Haloxylon ammodendron*	藜科 Chenopodiaceae	小半乔木 Small tree	0.107±0.017
	滨藜 *Atriplex patens*	藜科 Chenopodiaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.191±0.063
	齿稃草 *Schismus arabicus*	禾本科 Gramineae	短命植物 Ephemerophyte	0.017±0
	弯曲四齿芥 *Tetracme quadricornis*	十字花科 Brassicaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.106±0.068
	叉毛蓬 *Petrosimonia sibirica*	藜科 Chenopodiaceae	短命植物 Ephemerophyte	0.069±0.013

3.3 土壤水分状况

3.3.1 土壤水分垂直分布

图 7 为两林地 8 a 土壤平均含水量的垂直分布图，可见两种林地土壤的水分垂直变化明显不同。积雪-客沙造林土壤水分随土壤深度的增加先增大后趋于稳定，而秋灌造林则呈波动变化，在 30 cm、50 cm 和 70 cm 土层出现明显拐点。比较两个林地各层土壤含水量发现，0~30 cm 和 70~100 cm 土层秋灌造林土壤含水量较积雪-客沙造林高，两个土层土壤含水量积雪-客沙造林分别仅为 1.57%和 2.63%，秋灌造林则分别为 2.00%和 2.99%。

积雪-客沙造林和秋灌造林土壤水分变化范围分别为 1.05%~2.82%和 1.66%~3.24%，平均含水量二者基本相同，积雪-客沙造林为 2.29%，秋灌造林为 2.30%。从变异性来看，积雪-客沙造林大于秋灌造林，土壤水分平均变异系数分别为 0.49 和 0.22，表明秋灌造林土壤水分更稳定。

3.3.2 土壤水分时间变化

图 8a 是两个林地 2009—2016 年的土壤平均含水量变化，积雪-客沙造林地土壤水分含量受天然降水影响很大，秋灌造林 0~70 cm 土层年平均土壤含水量和积雪-客沙造林 0~120 cm 土层平均土壤含水量与年降雨量呈显著正相关。积雪-客沙造林和秋灌造林年平均土壤水分变化分别为 1.04%~3.92%和 1.68%~3.00%，可见积雪-客沙造林年际波动幅度大于秋灌造林地。积雪-客沙造林平均含水量略大于秋灌造林，多年平均含水量分别为 2.18%和 2.30%。

由图 8b 可知，两个林地月平均土壤含水量与月平均降雨量之间相关性不显著；积雪-客沙造林和秋灌造林土壤水分 4—9 月逐渐降低，10 月略有回升；在

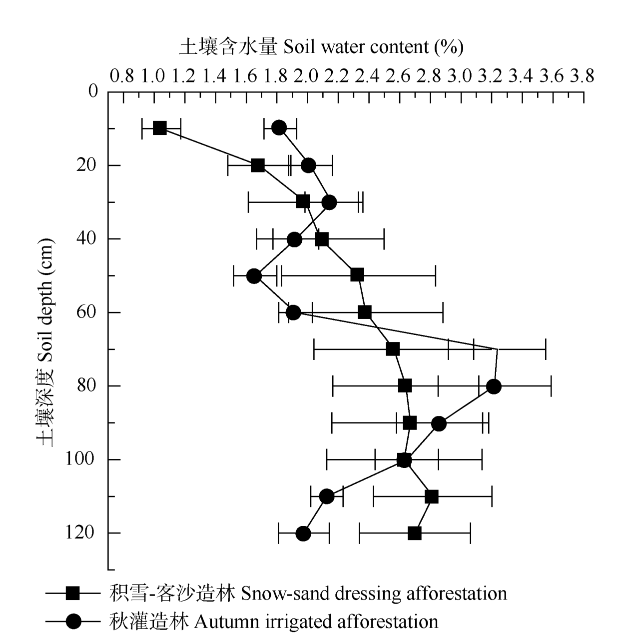


图 7　2009—2016 年莫索湾地区积雪-客沙造林和秋灌造林的 33 年生梭梭林地 8 a 平均土壤含水量变化

Fig. 7　Variations of average soil water content during 2009–2016 of 33 years old *Haloxylon ammodendron* forests planted with snow-sand dressing afforestation and autumn irrigated afforestation methods in Mosuowan area

降水较多、蒸发较小的 4—6 月，积雪-客沙造林土壤含水量高于秋灌造林，而至蒸发较大的 7—10 月，积雪-客沙造林土壤含水量则略低于秋灌造林。两个林地最低含水量一致，均为 1.94%，月最高土壤含水量和平均含水量不同，积雪-客沙造林为 3.95%和 2.61%，秋灌造林分别为 2.78 和 2.42%。

2015 年为干旱年，年降水量(81.65 mm)低于多年平均降水量(114.89 mm)，积雪-客沙造林最低含水量仅为 0.45%，月变异系数为 0.58，而秋灌造林最低含水量为 1.41%，月变异系数为 0.14。因此，从土壤水分时间变化来看，当年降雨量(2013—2015 年)和月降雨量(7—10 月)较低时，秋灌造林土壤含水量略高于积雪-客沙造林，表明秋灌造林对干旱的抵抗能力强于积雪-客沙造林。

4　讨论

4.1　两种人工林地生态差异的原因分析

两种人工林地的生态特征差异很明显，显然与造林技术的差异有关。秋灌造林经过造林初期 4 a 的人工灌溉，灌溉水携带的细粒物质加入沙土中，使土壤黏粒平均含量可增加到 3.95%，土壤保水性能得到改善；林地地形平整，降水分布较均匀，地表生物结皮发育较好，其盖度可达 60%，减小了土壤水分蒸发；由于林地梭梭种植密度较大，植物遮荫也能有效减弱土壤水分蒸发[23]，使 0~30 cm 土壤水分含量显著增加，为草本植物的恢复和梭梭幼苗的发生提供了有利条件，新萌发梭梭幼苗的死亡率相对较低。当受到干旱气候时，秋灌造林土壤水分下降较小，抵御干旱的能力较强。由于秋灌造林地梭梭林郁闭度大，且林下草本植被层盖度较高，导致林内光照不足，因此植物种较单一，草本植物多样性指数较低[24]。

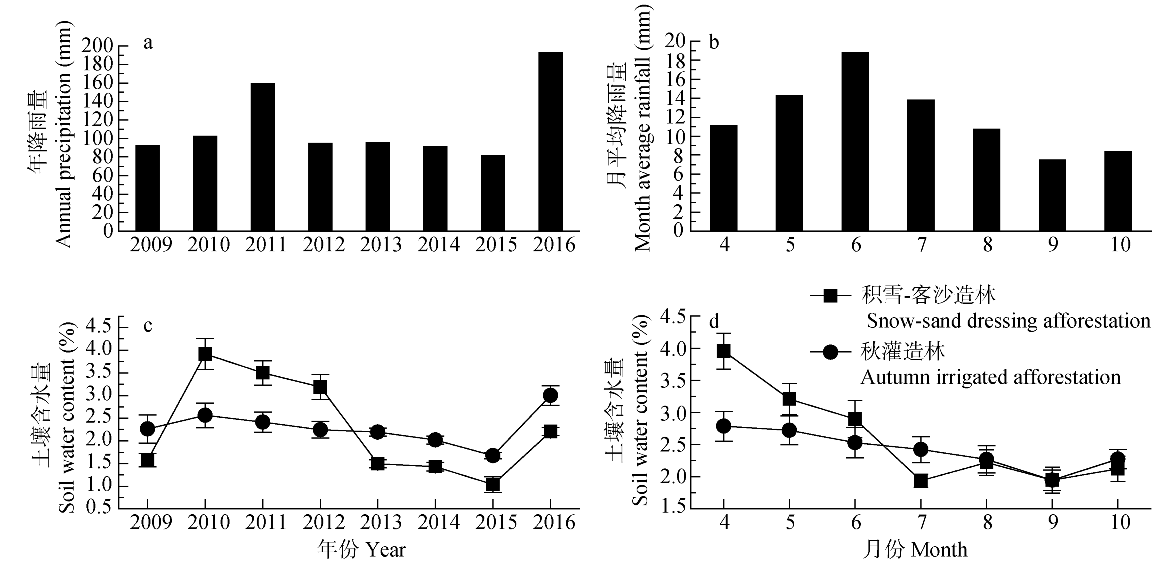


图 8　2009—2016 年降雨量和不同林地土壤水分随时间变化(a, c: 年平均降雨量和土壤含水量; b, d: 月平均降雨量和土壤含水量)

Fig. 8　Variations of rainfall and soil water content with time in 33 years old *Haloxylon ammodendron* forests planted with snow-sand dressing afforestation and autumn irrigated afforestation methods in Mosuowan area (a, c: annual variations of rainfall and soil moisture; b, d: monthly variations of rainfall and soil moisture)

积雪-客沙造林地在原有流沙地上直接造林，考虑到沙地地形相对起伏不平，沙地土壤保水能力弱，造林后完全依赖有限的天然降水，为了防止土壤水分与植物生态需水失衡，因而梭梭按照较低的种植密度种植。由于土壤受蒸发影响大，水分含量低，梭梭存活率较低，新萌发梭梭幼苗的死亡率较高，林下草本层盖度同样较低，但物种丰富度相对较高。

目前秋灌造林梭梭长势不如积雪-客沙造林，可能与植物密度过大，植株间存在强烈的水分竞争有关。并且，秋灌造林部分梭梭出现白粉病，是否与密度有关，还需进一步研究确定。后期的经营管理，需要考虑秋灌造林梭梭的密度调整，可通过适当的人工间伐，提高梭梭的生长质量和林地物种多样性。

4.2 流沙地免灌溉人工梭梭林的生长适应性

林木成活仅是判断人工造林成功的基本条件[25]，而林木能够持续生长发育并具有良好的生态作用则是造林成功的必要条件，因而判断造林成功的关键是确定人工林的功能可持续性和对当地环境的适应性。如我国甘肃、内蒙等地的部分人工梭梭林建成后出现了土壤水分明显下降、林木正常生长受阻甚至死亡的现象，严重影响了人工林的功能发挥和可持续发展[26-28]。自然更新是影响人工林物种组成、结构和动态变化的重要因素，对种群的发展和群落稳定及演替具有重要作用[29]，是判定人工林可持续性的重要方面。

1983 年，为了恢复沙漠边缘退化植被和防止绿洲风沙危害，在古尔班通古特沙漠南缘莫索湾地区流沙地上成功建植了梭梭林。经过 33 a 的生长，目前该人工林仍保持了较高的存活率，形成了较大的冠幅，当年新生枝生长良好，株高呈增加趋势，林内伴生有不同林龄的自然更新苗木，林下草本植物和生物结皮发育良好，林地发挥了良好的防风固沙作用。

土壤水分含量是影响干旱和半干旱区防风固沙植被的决定性因素。虽然梭梭具有超强的耐旱能力，但干旱也同样影响其生长。马全林等[30]发现，当风沙土含水量>1.30%，梭梭能够生长正常；当含水量<0.82%，梭梭即死亡；含水量介于 0.82%~1.30%时，梭梭生长量极低，仅能维持存活。本文两种流沙地人工梭梭林在长期免灌溉的条件下，土壤剖面平均含水量均可保持在 2%以上，能够保证梭梭正常生长、结实乃至种子萌发生长。林木自然更新是林地对当地环境适应的重要表征，而林地水分状况也是林地更新的先决条件。由于相对较好的土壤水分条件，两种林地中已经生长有不同林龄的自然更新梭梭苗木，使林地梭梭密度较种植初期有所提高，表明这两种人工梭梭林地已具备较好的自然更新能力，林分已形成异龄复层混交林[31-32]，有利于人工林的长期适应性。

研究区天然降水也存在较大年际和年内波动变化，降水量年际和年内变异系数分别为 0.35 和 0.32，受此影响，林地土壤水分也存在明显的年际和年内变化，其中积雪-客沙造林地土壤水分年际和年内变异系数分别为 0.48 和 0.29，而秋灌造林地分别为 0.17 和 0.12。可见，造林技术不同，林地土壤水分对气候变化的适应能力不同，其中积雪-客沙造林由于植被盖度低、土壤水分蒸发损失比率大，土壤水分波动大于天然降水；而秋灌造林地由于拥有较高的植被盖度、土壤水分蒸发损失比率小，对干旱气候的适应能力强，土壤水分波动小于降水。因此，从林地对极端干旱年适应角度来看，秋灌造林地对该区生态条件适应性更强。

5 结论

1983 年古尔班通古特沙漠南缘莫索湾地区流沙地生态恢复重建时采用当地乡土灌木梭梭，经过 33 年的生长，目前梭梭林均已具备较好的自然更新能力，与造林初期相比，现有密度有所提高，初始造林梭梭存活率较高，林下草本覆盖度均大于 20%，发挥了很好的固沙作用。秋灌造林在干旱期土壤水分条件较积雪-客沙造林好，对干旱的抵抗能力强于积雪-客沙造林，并且能够承受的植被容量远远高于积雪-客沙造林，但梭梭株高增长量和新枝生长量不如积雪-客沙造林。从林地的梭梭存活率、林木自然更新、梭梭生长状况、林下植被恢复情况和土壤水分条件来看，两种造林技术下梭梭林生长均能够满足功能的可持续性。

梭梭林目前生长良好，这得益于造林时对树种、立地条件、种植密度等的科学选择。古尔班通古特沙漠是我国梭梭荒漠的典型区域之一，梭梭是主要的建群种，对地带性的生态条件有极强的适应性，繁殖更新能力强，生态恢复重建选用梭梭作为造林树种易于成功；此外，古尔班通古特沙漠地区冬季有稳定的积雪，春季融化后提高了土壤水分，而此时正是植物萌发、生长的季节，利于人工林的存活和自然更新；同时，虽然该区降雨量小，但 3—5 月降水较频繁，为春季人工造林提供较好的水分条件。

两种造林技术各有优缺点，秋灌造林在造林初

期进行人工灌溉能够有效改善沙土的含水量和土壤质地，提高梭梭的成活率，植被容量更高，但成本也高，耗工费力，后期需考虑植被密度问题。积雪-客沙造林是一种因地制宜节省投资的造林方式，但梭梭存活率较低，自然更新能力相对较弱。

参考文献 References

[1] 朱教君. 防护林学研究现状与展望[J]. 植物生态学报, 2013, 39(9): 872–888
Zhu J J. A review of the present situation and future prospect of science of protective forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2013, 39(9): 872–888

[2] 柏方敏, 戴成栋, 陈朝祖, 等. 国内外防护林研究综述[J]. 湖南林业科技, 2010, 37(5): 8–14
Bai F M, Dai C D, Chen C Z, et al. Progress of research on worldwide protection-forest[J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2010, 37(5): 8–14

[3] 李秀芬, 苏蕾, 张金鑫, 等. 晋西北防护林 30 年来时空变化特征及影响要素[J]. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2382–2389
Li X F, Su L, Zhang J X, et al. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of protection forests after their 30 years construction in Northwest Shanxi Province of China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(9): 2382–2389

[4] 朱教君, 李凤芹. 森林退化/衰退的研究与实践[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1601–1609
Zhu J J, Li F Q. Forest degradation/decline: Research and practice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(7): 1601–1609

[5] 张泽秀, 刘利民, 贾燕, 等. 三北地区防护林气候生态适应性分析[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1696–1701
Zhang Z X, Liu L M, Jia Y, et al. Climatic ecological adaptation of shelter forests in Three-North Regions[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(9): 1696–1701

[6] 廖空太, 满多清, 张锦春, 等. 河西绿洲防护林发展现状及发展趋势探讨[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 17–21
Liao K T, Man D Q, Zhang J C, et al. Contemporary situation of oasis shelterbelts and developing tendency in Hexi Corridor[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 17–21

[7] 白雪峰, 韩辉, 周凤艳, 等. 沙地樟子松针叶保水力及相对含水量动态变化分析[J]. 防护林科技, 2008, (3): 51–53
Bai X F, Han H, Zhou F Y, et al. Analysis on dynamic change of relative water content and needle water conservation of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* on sandy land[J]. Protection Forest Science and Technology, 2008, (3): 51–53

[8] 夏训诚, 李崇舜, 周兴佳, 等. 新疆沙漠化与风沙灾害治理[M]. 北京: 科学出版社, 1991
Xia X C, Li C S, Zhou X J, et al. Management of Desertification and Sandstorm Disaster in Xinjiang[M]. Beijing: Science Press, 1991

[9] 黄培祐, 吕自力. 莫索湾绿洲的建立与梭梭荒漠的动态研究[J]. 干旱区资源与环境, 1995, 9(4): 173–179
Huang P Y, Lü Z L. Studies on establishment of Mosouwan oasis and the variation of sacsaoul desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1995, 9(4): 173–179

[10] 贾亚敏, 刘彤, 骆郴, 等. 新疆莫索湾南缘沙漠四种灌木空间异质性的对比[J]. 干旱区研究, 2008, 25(2): 225–230
Jia Y M, Liu T, Luo C, et al. Comparative study on the spatial heterogeneity of four shrub species in southern marginal zone of the Mosuowan desert[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(2): 224–230

[11] 中国科学院. 沙漠腹地的奇迹[EB/OL]. (2010-10-26). http://www.cas.cn/kxcb/kpwz/201010/t20101026_2993438.shtml.
Chinese Academy of Sciences. The miracle of desert hinterland [EB/OL]. (2010-10-26). http://www.cas.cn/kxcb/kpwz/201010/t20101026_2993438.shtml.

[12] 张立运, 崔望诚. 莫索湾一五零团农场绿洲生态环境的基本情况及其保护[J]. 干旱区研究, 1990, 7(1): 11–17
Zhang L Y, Cui W C. The main characteristics of oasis ecotope and its protection in the farm of 150th corps[J]. Arid Zone Research, 1990, 7(1): 11–17

[13] 钱亦兵, 李银芳. 莫索湾垦区荒漠化土地物理特性研究[J]. 干旱区研究, 1999, 16(2): 41–46
Qian Y B, Li Y F. Study on soil physical properties of desertified land in Mosuowan reclamation area[J]. Arid Zone Research, 1999, 16(2): 41–46

[14] 李银芳, 杨戈. 梭梭固沙林水分平衡研究——Ⅰ. 梭梭柴秋灌固沙林的水分状况[J]. 干旱区研究, 1996, 13(2): 44–50
Li Y F, Yang G. Studies on the moisture balance of *Haloxylon ammodendron* sand-break forest: Ⅰ the moisture state of *Haloxylon ammodendron* autumn irrigated sand-break forest[J]. Arid Zone Research, 1996, 13(2): 44–50

[15] 王炜, 梁存柱, 朱宗元, 等. 梭梭年轮测定方法及生长动态的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2001, 15(2): 67–74
Wang W, Liang C Z, Zhu Z Y, et al. Studies on the measuring method of growth rings of *Haloxylon Ammodendron* and its growing dynamics[J]. Journal of Arid Land Resources & Environment, 2001, 15(2): 67–74

[16] 李建贵, 宁虎森, 刘斌. 梭梭种群性状结构与空间分布格局的初步研究[J]. 新疆农业大学学报, 2003, 26(3): 51–54
Li J G, Ning H S, Liu B. Study on character structure and distribution pattern of *Haloxylon ammodron*[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2003, 26(3): 51–54

[17] 黄培祐, 李启剑, 袁勤芬. 准噶尔盆地南缘梭梭群落对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6051–6059
Huang P Y, Li Q J, Yuan Q F. Effects of climate change on *Haloxylon ammodendron* community in southern edge of Zhunger Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6051–6059

[18] 陈生云, 刘文杰, 叶柏生, 等. 疏勒河上游地区植被物种多样性和生物量及其与环境因子的关系[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 70–83
Chen S Y, Liu W J, Ye B S, et al. Species diversity of vegetation in relation to biomass and environmental factors in the upper area of the Shule River[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(3): 70–83

[19] 刘国军, 张希明, 朱军涛, 等. 准噶尔盆地东南缘梭梭种群

结构与动态研究[J]. 西北植物学报, 2011, 31(6): 1250–1256
Liu G J, Zhang X M, Zhu J T, et al. Structure and dynamics of *Haloxylon ammodendron* population along the southeastern margin of the Zhunger Basin[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2011, 31(6): 1250–1256

[20] 李巧梅, 曾勇, 孙钦明, 等. 决定古尔班通古特沙漠短命植物分布的关键因子是 5 月降水[J]. 生态学杂志, 2014, 33(8): 2038–2045
Li Q M, Zeng Y, Sun Q M, et al. Precipitation in May is a key factor to determinate the distribution of ephemeral plants in Gurbantünggüt Desert[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(8): 2038–2045

[21] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 等. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(10): 2323–2331
Kang B, Liu S R, Cai D X, et al. Effects of *Pinus massoniana* plantation stand density on understory vegetation and soil properties[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(10): 2323–2331

[22] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 等. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 598–605
Wang X Q, Jiang J, Lei J Q, et al. The distribution of ephemeral vegetation on the longitudinal dune surface and its stabilization significance in the Gurbantunggut Desert[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 598–605

[23] 徐先英, 严平, 郭树江, 等. 干旱荒漠区绿洲边缘典型固沙灌木的降水截留特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 141–145
Xu X Y, Yan P, Guo S J, et al. The interception loss of rainfall by three sand-fixing shrubs at the fringe of Minqin Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 141–145

[24] 邹扬, 贺康宁, 赵畅, 等. 高寒区青海云杉人工林密度与林下植物多样性的关系[J]. 西北植物学报, 2013, 33(12): 2543–2549
Zou Y, He K N, Zhao C, et al. Relationship between plantation density and the plants diversity under forest of *Picea crassifolia* in Alpine region[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(12): 2543–2549

[25] 曾德慧, 姜凤岐, 范志平, 等. 樟子松人工固沙林稳定性的研究[J]. 应用生态学报, 1996, 7(4): 337–343
Zeng D H, Jiang F Q, Fan Z P, et al. Stability of Mongolian pine plantations on sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1996, 7(4): 337–343

[26] 张锦春, 纪永福, 王芳林, 等. 民勤退化人工梭梭种群雨养恢复试验研究[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(1): 77–81
Zhang J C, Ji Y F, Wang F L, et al. Rain-fed recovery of degenerated artificial *Haloxylon ammodendron* population in Minqin[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 77–81

[27] 黄子琛, 刘家琼, 鲁作民, 等. 民勤地区梭梭固沙林衰亡原因的初步研究[J]. 林业科学, 1983, 19(1): 82–87
Huang Z C, Liu J Q, Lu Z M, et al. Preliminary research in the cause of *Haloxylon ammodendron* degredation in Minqin[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1983, 19(1): 82–87

[28] 张希林. 浅析阿拉善荒漠梭梭林的退化原因和保护利用[J]. 内蒙古林业科技, 1999, (2): 1–3
Zhang X L. Studying on the cause of *Haloxylon ammodendron* degredation and conservation[J]. Inner Mongolia Forestry Science & Technology, 1999, (2): 1–3

[29] 李小双, 彭明春, 党承林. 植物自然更新研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 2081–2088
Li X S, Peng M C, Dang C L. Research progress on natural regeneration of plants[J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 26(12): 2081–2088

[30] 马全林, 王继和, 朱淑娟. 降水、土壤水分和结皮对人工梭梭(*Haloxylon ammodendron*)林的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5057–5067
Ma Q L, Wang J H, Zhu S J. Effects of precipitation, soil water content and soil crust on artificial *Haloxylon ammodendron* forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5057–5067

[31] Carnevale N J, Montagnini F. Facilitating regeneration of secondary forests with the use of mixed and pure plantations of indigenous tree species[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 163(1/3): 217–227

[32] 王晗生. 干旱影响下人工林的天然更新进程[J]. 干旱区研究, 2012, 29(5): 743–750
Wang H S. Natural regeneration of plantation forests under drought[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(5): 743–750